

文章编号 1004-924X(2010)02-0384-06

# 超音速光学导引头整流罩的形状优化

魏 群<sup>1,2</sup>, 艾兴乔<sup>1,2</sup>, 姜湖海<sup>1,2</sup>, 宣 明<sup>1</sup>, 贾宏光<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为了改善导引头整流罩形状对导引头内光学系统成像质量的影响, 减小导弹总体飞行阻力, 以优化整流罩形状为目的, 对整流罩外曲线与内曲线进行了分析和优化。首先进行了计算流体力学(CFD)数值仿真与风动试验对比, 得到准确的仿真参数; 在此基础上, 通过 CFD 数值仿真得到整流罩外曲线长径比与整流罩阻力系数的归一化关系函数, 采用光程差的评价方法得到整流罩外曲线长径比与成像质量的归一化关系函数, 在确定空气动力性能与成像质量权重后, 得到优化后的整流罩外曲线, 外曲线为  $R$  为 37.5,  $C$  为  $-0.75$  的椭圆。在获得外曲线形状的基础上, 以光线经过整流罩后偏折最小为优化目标, 运用光线追迹方法, 建立优化函数, 最终得到优化的整流罩内曲线, 内曲线为  $R$  为 33.31,  $C$  为  $-0.78$  的椭圆。对整流罩内、外曲线方程的分析表明, 这种优化的整流罩既有良好的空气动力学性能, 也有良好的光学性能。

**关键词:** 整流罩; 优化设计; CFD; 光线追迹

**中图分类号:** V448.1    **文献标识码:** A

## Optimizing design of dome figure for supersonic seekers

WEI Qun<sup>1,2</sup>, AI Xing-qiao<sup>1,2</sup>, JIANG Hu-hai<sup>1,2</sup>, XUAN Ming<sup>1</sup>, JIA Hong-guang<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*  
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** With the aim to reduce the effect of the figure of a dome on the imaging quality of optical system for a missile and to decrease the flying drags of the missile, the figure of the dome was investigated and the outside and inside figures of the dome were optimized. Firstly, the Calculated Fluid Dynamics(CFD) simulation and a wind tunnel experiment were compared to obtain the accuracy simulated parameters, and the normalized relation function between the ellipticity and the drag of dome was derived by the CFD simulation. Then, the Optical Path Difference(OPD) was used to evaluate the normalized relation of the optical performance and ellipticity, and the optimized outside figure could be obtained after determining the weights of the aerodynamic and imaging quality. The obtained outside figure is an elliptic with  $R=37.5$  and  $C=-0.75$ . On the basis of the outside figure and by taking the minimum deviation of the light through the dome as an optimizing goal, the optimized function was established by using ray tracing method, and an optimized inside figure of the dome was also obtained. The inside figure is a conic with  $R=33.31$  and  $C=-0.78$ . An analysis shows the optimized dome has

收稿日期:2009-09-18; 修订日期:2009-11-10.

基金项目:中国科学院“三期”创新工程资助项目

excellent aerodynamics and good optical performances.

**Key words:** dome; optimize design; Calculated Fluid Dynamics(CFD); ray tracking

## 1 引言

导引头作为导弹搜索、锁定与跟踪目标的分系统,位于导弹的最前端,而整流罩位于导引头的最前端,因此整流罩成为导弹最前端的组件。整流罩的作用主要有以下三点:第一,作为光学成像系统的第一片镜片,完成成像任务;第二,整流罩与导引头光学舱壁密封连接,有效地保护了导引头光学舱内部器件;最后,整流罩设计在满足成像探测与跟踪指标的前提下,尽量缩小整流罩半径,进而减小导弹飞行阻力。

在实际工程设计中,为了使光学镜头在整个搜索视场范围内成像清晰,光学成像导引头的整流罩一般设计成球形,在安装过程中,将摄像机稳定平台的俯仰偏航两轴焦点与整流罩的球心重合,以保证稳定平台在转动过程中整流罩产生的像差是相同的。然而,球形整流罩并不是最理想的空气动力学外形,球形整流罩产生的阻力比较大<sup>[1]</sup>。为了解决这个问题,美国率先开展了“共型光学”的研究<sup>[2-11]</sup>。同时,也从理论上计算了光线通过非球形整流罩产生的像差<sup>[12]</sup>。但是,该项研究并没有计算导弹在超音速飞行过程中因激波产生的像差。

本文通过计算流体力学(CFD)仿真与风洞试验对比,获得最优的 CFD 数值仿真控制参数,在此基础上模拟出整流罩外曲线线形与导引头阻力系数的关系,并得到该关系的归一化曲线方程;以光程差为评价标准,得到整流罩外曲线线形与成像质量之间关系的归一化曲线方程。以上述两个方程为基础建立优化函数,在确定整流罩光学性能与空气动力学性能的权重后,最终得到整流罩外曲线方程,并在此基础上,以光线经过整流罩后光线偏折最小为优化目标,通过光线追迹的方法,得到内曲线方程<sup>[13]</sup>。

## 2 CFD 仿真与风洞试验对比

CFD 仿真是一种经济快捷的获得气动数据的方法,但其准确性欠佳;风洞试验能够得到准确

的空气动力学数据,但其价格昂贵且周期漫长。因此,本文通过对相同的模型,在相同的试验条件下的风洞试验数据与 CFD 仿真结果对比,确定仿真参数。在得到准确的仿真控制参数的基础上,通过大量的 CFD 仿真,得到了整流罩外曲线与阻力系数关系曲线。

对比试验模型几何图如图 1 所示,对其外部流域划分结构化网格,网格如图 2 所示。CFD 仿真运用计算流体力学软件 FLUENT,采用基于密度的求解器,运用  $k-\epsilon$  湍流模型,仿真状态为速度  $3 Ma$ ,攻角为  $0^\circ$ 。

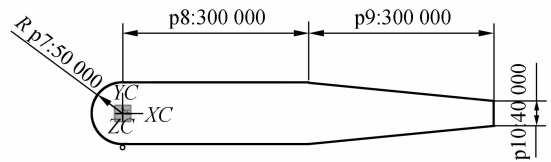


图 1 对比试验模型结构

Fig. 1 Model structure of comparing experiment

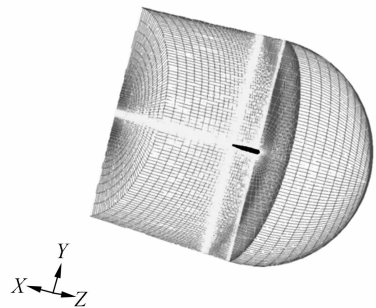


图 2 CFD 数值仿真网格

Fig. 2 Grid of CFD simulation

风洞试验采用与 CFD 仿真相同的模型,材料为 30CrMnSiA,如图 3 所示,风洞试验装置如



图 3 风洞模型

Fig. 3 Wind tunnel model

图 4 所示,静压云图结果对比如图 5 所示,经计算 CFD 仿真与风洞试验数据得阻力值之差 < 5%。通过云图和数值对比可知,此种仿真方法所得数据精度满足工程试验要求。

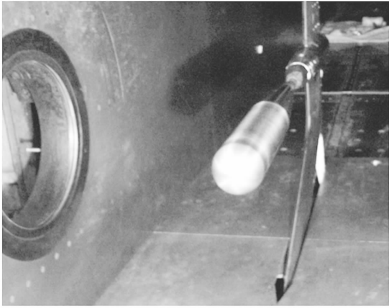
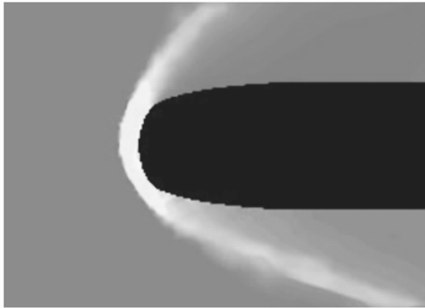
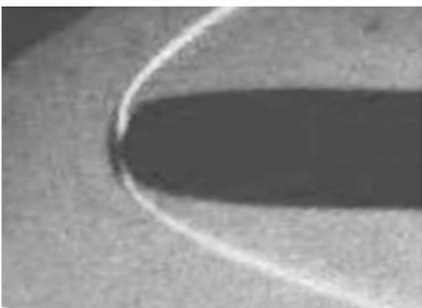


图 4 风洞试验装置  
Fig. 4 Setup for wind tunnel



(a) 仿真云图  
(a) Simulation nephogram



(b) 风洞试验云图  
(b) Experimental nephogram

图 5 外流场静压云图 CFD 与风洞试验对比  
Fig. 5 Static pressure comparison of CFD simulation and experiment

### 3 整流罩外曲线设计

在众多的二次曲线中,椭圆是最容易校正误

差的,因此整流罩外曲线选择椭圆,椭圆率表示为:

$$\epsilon = \frac{a}{b}, \quad (1)$$

其中  $a$  为椭圆长轴,  $b$  为椭圆短轴。本文计算  $\epsilon$  值从 1 到 3, 间隔为 0.2 共 11 个点, 仿真模型如图 6 所示。通过上述经过风洞试验验证的 CFD 方法, 分别计算在  $3 Ma$  速度飞行下这 11 个模型, 得到其阻力系数。设  $\epsilon=1$  时的阻力系数为 1, 得到阻力系数归一化函数为:

$$y_D = 0.10436\epsilon^2 - 0.70503\epsilon + 1.5931, \quad (2)$$

函数曲线图如图 7 所示。

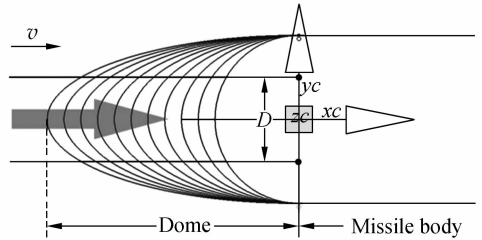


图 6 仿真模型  
Fig. 6 CFD simulation model

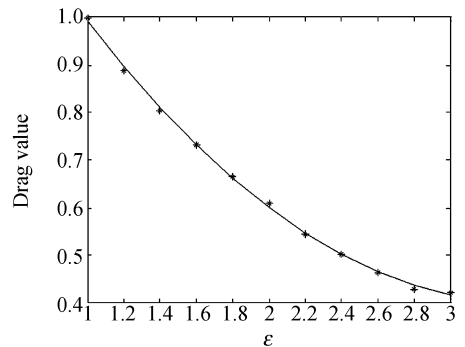


图 7 阻力系数与椭圆率关系函数曲线  
Fig. 7 Relation function between drag and ellipticity

通过 CFD 仿真,不但能够得到阻力系数,还可以得到整流罩外流场密度云图,通过 GFD 定律,可以得到整流罩外流场折射率云图。光程差的计算方法为:

$$OPD(x, y) = \int_0^l \Delta n(x, y, z) dz, \quad (3)$$

其中,  $l$  为光路长度。本文将整流罩外流场划分成有限元网格,因此需将方程(3)离散化,结果为:

$$OPD = \sum_{n=1}^i (x_{n+1} - x_n) \Delta n_n, \quad (4)$$

经计算得其归一化函数为:

$$y_0 = -0.32131\epsilon^3 + 1.8931\epsilon^2 - 3.0122\epsilon + 1.6579, \quad (5)$$

函数曲线如图 8 所示。

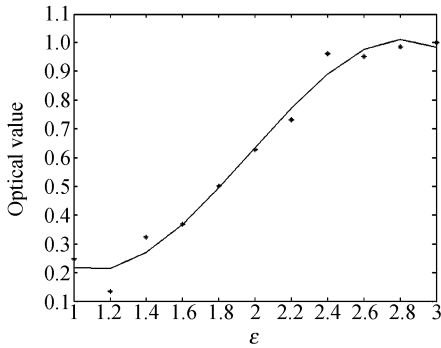


图 8 光学性能系数与椭圆率关系函数曲线

Fig. 8 Relation function between optical performance and ellipticity

通过上述方法得到了空气动力学与光学评价函数,建立优化函数为:

$$f(\epsilon) = A \cdot y_D - B \cdot y_0, \quad (6)$$

其中,  $A, B$  为空气动力学性能和光学性能权重,根据具体工作环境,本文中  $A=B=1$ 。求解优化函数,可得  $\epsilon = 1.9653 \approx 2$ ,至此得到外曲线形状。

### 4 整流罩内曲线设计

来自目标的光线首先通过因超音速飞行产

生的激波,然后通过附面层,经整流罩折射后,进入光学系统,如图 9 所示。

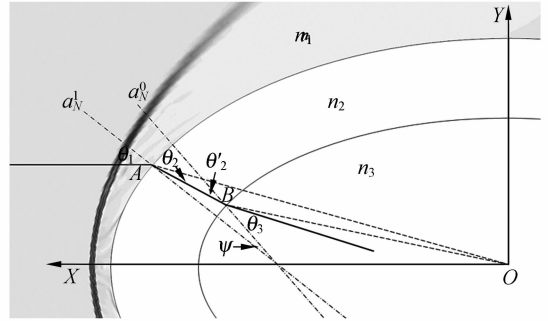


图 9 光线传播示意图

Fig. 9 Ray transmit figure

由图得知,光线通过整流罩后偏转角度为:

$$\epsilon\theta = \theta_3 - (\theta_1 + \Psi) = (\theta_3 + \theta_2) - (\theta_1 + \theta_2'), \quad (7)$$

设外曲线方程为:

$$f(x, y) = \left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 - 1 = 0, \quad (8)$$

内曲线方程为:

$$g(x, y) = \left(\frac{x}{a'}\right)^2 + \left(\frac{y}{b'}\right)^2 - 1 = 0, \quad (9)$$

则:

$$\cos \theta_2 = -\hat{R} \cdot \hat{a}_N^{(0)} = \frac{(x_0 - x_1) \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_0 + (y_0 - y_1) \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_0}{\left[ \{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2\} \left\{ \left[ \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_0 \right]^2 + \left[ \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_0 \right]^2 \right\} \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (10)$$

$$\cos \theta_2' = -\hat{R} \cdot \hat{a}_N^{(1)} = \frac{(x_0 - x_1) \left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)_1 + (y_0 - y_1) \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)_1}{\left[ \{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2\} \left\{ \left[ \left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)_1 \right]^2 + \left[ \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)_1 \right]^2 \right\} \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (11)$$

根据折射定律得到<sup>[14]</sup>:

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1, \quad (12)$$

$$n_3 \sin \theta_3 = n_2 \sin \theta_2', \quad (13)$$

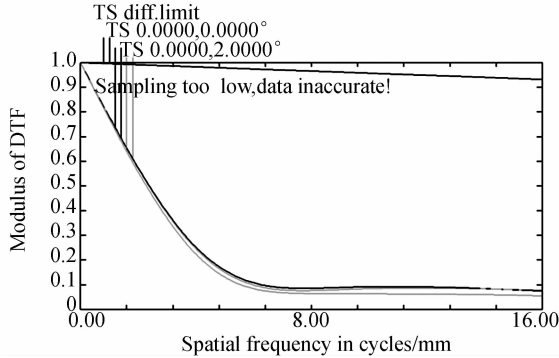
经过计算可得:

$$\cos \theta_2' = \frac{(x_0 - x_1) \frac{x_1}{a'^2} + (y_0 - y_1) \theta \frac{y_1}{b'^2}}{\left[ \left\{ \left(\frac{x_1}{a'}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{b'}\right)^2 \right\} \{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2\} \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (14)$$

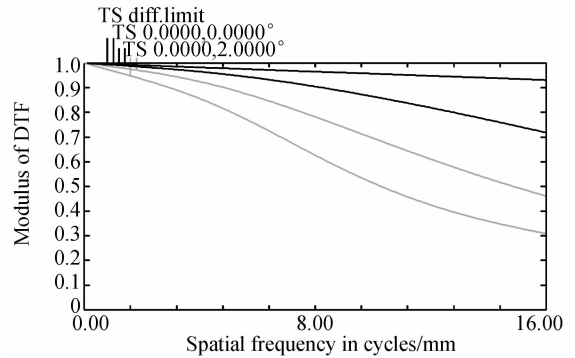
$$\cos \Psi = \hat{a}_N^{(0)} \cdot \hat{a}_N^{(1)} = \frac{\left(\frac{x_0}{a^2}\right)\left(\frac{x_1}{a'^2}\right) + \left(\frac{y_0}{b^2}\right)\left(\frac{y_1}{b'^2}\right)}{\left[\left(\frac{x_0}{a^2}\right)^2 + \left(\frac{y_0}{b^2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{x_1}{a'^2}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{b'^2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (15)$$

其中,  $n_1 = n_3 = 1, n_2 = 1.768, a = 150, b = 75, a' = 142.5$ , 求解得  $b' = 68.894$ , 即  $R = 33.308, C = -$

$0.777\ 252$ 。对比经过优化与不优化的整流罩传递函数图 10 所示。



(a) 未经优化整流罩 MTF  
(a) Un-optimized MTF



(b) 经过优化整流罩 MTF  
(b) Optimized MTF

图 10 MTF 对比图

Fig. 10 Comparison figure of MTFs

## 5 结 论

本文通过 CFD 数值仿真与风洞试验对比, 获得了最优的 CFD 数值仿真控制参数。通过大量的仿真分析, 得到了整流罩外曲线线形与导引头阻力系数的关系方程, 并得到其归一化曲线方程。以光程差为评价标准, 得到整流罩外曲线线形与成像质量之间关系的归一化曲线方程。以上述两个方程为基础建立优化函数, 根据具体应用环境,

假设整流罩光学性能与空气动力学性能的权重相同后, 最终得到整流罩外曲线方程, 并在此基础上, 以光线经过整流罩后光线偏折最小为优化目标, 通过光线追迹的方法, 得到内曲线方程。通过计算, 整流罩外曲线为  $R=37.5, C=-0.75$  的椭圆, 内曲线为  $R=33.308 \approx 33.31, C=-0.777\ 252 \approx -0.78$  的椭圆。

在下一阶段的工作中, 将通过风洞试验, 验证设计结果的成像质量。

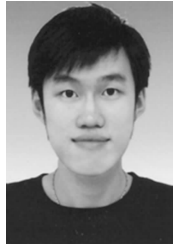
## 参考文献:

[1] 阮萍, 胡永明, 孙永善. 超音速机载成像探测设备的窗口设计与分析[J]. 光电子·激光, 2001(7): 206-207.  
RUAN P, HU Y M, SUN Y SH. The window design and analysis of airplane-carried facilities in supersonic mode[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2001(7): 206-207. (in Chinese)

[2] SHANNON R R. Overview of conformal optics[J]. *SPIE*, 1999, 3705: 180-188.  
[3] SPARROLD S W. Arch corrector for conformal optical systems[J]. *SPIE*, 1999, 3705: 189-200.  
[4] MILLS J P, SPARROLD S W, MITCHELL T A. Conformal dome aberration correction with counter-rotating phase plates[J]. *SPIE*, 1999, 3705: 201-208.  
[5] MICHELL T A, SASIAN J M. Variable aberration

- correction using axially translating phase plates[J]. *SPIE*, 1999,209:220.
- [6] LEMER S A, SASIAN J M, GREIVENKAMP J E, *et al.*. Interferometric metrology conformal domes [J]. *SPIE*, 1999,3705:221-226.
- [7] GOLA J S, ASKINAZI J. Fabrication of conformal ZnS domes by chemical vapor deposition[J]. *SPIE*, 1999,3705:227-236.
- [8] LERNER S E, SASIAN J M, GREIVENKAMP J E. Novel surface representation for conformal optics [C]. *Proc. 8th DoD April*, 2000:232-240.
- [9] SCHAEFER J, EICHHOLTZ R. Fabrication challenges associated with conformal optics[C]. *Proc. 8th DoD April*, 2000:253.
- [10] HEGG R G, CHEN C B. Testing conformal windows with null optics[C]. *Proc. 8th DoD April*, 2000:254-259.
- [11] MILLS J P, KNAPP D J, SMITH C B, *et al.*. Conformal optics proof of concept [C]. *Proc. 8th DoD April*, 2000:260-266.
- [12] JOSEPH R I, THOMAS M E. Ray path deviation in a non-hemispherical dome [J]. *SPIE*, 2001, 4375:160-170.
- [13] 张颖, 赵慧洁, 邢辉, 等. 透射式旋转对称光学系统中的偏振像差 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(4): 757-763.  
ZHANG Y, ZHAO H J, XING H, *et al.*. Polarization aberrations of transmitting rotationally symmetric optical systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4):757-763. (in Chinese)
- [14] 王丽萍, 张立超, 金春水, 等. 采用多种群遗传算法的全景成像系统非球面设计 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5):1020-1025.  
WANG L P, ZHANG L CH, JIN CH SH, *et al.*. Design of aspheric mirror for panoramic imaging system using multi-population genetic algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1020-1025. (in Chinese)

#### 作者简介:



魏群(1983—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2005年于浙江大学获得学士学位,主要从事气动光学方面的研究。E-mail: wei.q@hotmail.com



艾兴桥(1982—),男,湖北荆门人,博士研究生,2006年于中南大学获得学士学位,主要从事结构优化设计方面的研究。E-mail: aixingqiao@ciomp.ac.cn

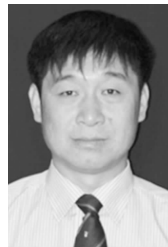


姜湖海(1984—),男,山东烟台人,博士研究生,2007年于中国地质大学获得学士学位,主要从事稳定平台控制系统设计方面的研究。E-mail: jianghh@ciomp.ac.cn



贾宏光(1971—),男,黑龙江五常人,研究员,博士生导师,2000年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光机电系统微小化与精确制导技术研究。E-mail: jiahg@ciomp.ac.cn

#### 导师简介:



宣明(1956—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事微光机电系统方面的研究。E-mail: xuanm@ciomp.ac.cn